

Die Physik des Erdkörpers

Elsasser, Walter M.

Veröffentlicht in:
Abhandlungen der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 27, 1977,
S.333-346



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

Die Physik des Erdkörpers

Von **Walter M. Elsasser**

Als ich in den zwanziger Jahren ein Student der Physik in Göttingen war, da mußte man für den Doktorgrad zwei Nebenfächer haben, für die ich Astronomie und Mathematik gewählt habe. Die Astronomie befand sich damals in demselben Gebäude, das die Regierung von Hannover für Gauß gebaut hatte, als er sein Lehramt an der Universität antrat. Das war im Jahre 1807; er lebte in diesem Hause bis zu seinem Tode im Jahre 1855. Zu Gauß' Zeiten wurde das Erdgeschoß als Arbeitsräume benutzt; die Familie lebte im zweiten Stock. Zu meiner Zeit waren die Büros der Astronomen im zweiten Stockwerk; der erste Stock diente als inoffizielles Gauß-Museum. Auf diese Weise hatte ich auch die Möglichkeit, mir die Gaußsche Bibliothek gelegentlich anzusehen. Die Wände des Erdgeschosses waren vom Boden bis zur Decke mit Büchergestellen bedeckt, die den nichtmathematischen Teil der Bibliothek von Gauß enthielten; die mathematischen und anderen wissenschaftlichen Bücher hatte man offenbar woanders untergebracht. Aber die Bibliothek, die ich sah, war so groß, daß man annehmen sollte, Gauß habe sich alle diese Bücher nicht selbst gekauft. Da er schon zu seinen Lebzeiten ein weltberühmter Mann war, haben ihm wohl alle möglichen Autoren und Verleger Bücher zugeschickt, die er sicher nicht Zeit hatte alle zu lesen.

Eines Tages blätterte ich durch eine der frühen Ausgaben der „Kritik der reinen Vernunft“ und fand darin einige Randbemerkungen in Bleistift, die wohl von Gauß selbst herrührten.

Eines der größten Verdienste von Gauß ist seine Erforschung des Erdmagnetismus, die er in den dreißiger Jahren des letzten Jahrhunderts zusammen mit seinem Göttinger Kollegen, dem Physiker Wilhelm Weber, unternommen hat. Die magnetischen Meßinstrumente, die Gauß damals erfand, waren so ausgezeichnet, daß deren Konstruktion sich in der Folge gar nicht mehr verändert hat; erst in den letzten Jahrzehnten sind ganz neue, genauere Methoden der Messung auf elektronischer Grundlage eingeführt worden, welche Gauß' Instrumente jetzt verdrängt haben. Mit der Hilfe von vielen Laien, die Gauß im Jahre 1836 in dem „Göttinger magnetischen Verein“ organisierte, konnte er dann die bemerkenswerten Variationen des Erdmagnetismus im Raume sowie in der Zeit quantitativ studieren. Aber Gauß ging noch weiter. Er zeigte, wie man vorgeht, wenn man das magnetische Feld auf der Erdoberfläche in eine Reihe von Kugelfunktionen entwickeln will. Diese Funktionen waren von Legendre erfunden und von Laplace bereits ausführlich angewandt worden, aber nur in einer rein theoretischen Weise. Gauß zeigte, wie man dieselben Reihen numerisch behandelt, wobei man die Größe der Koeffizienten durch die Gaußsche Methode der kleinsten Quadrate mit minimalen Fehlern bestimmt, so daß die Reihe eine optimale Approximation darstellt. Dann bewies er seinen be-

rühmten Satz, daß sich auf diese Weise das Feld eindeutig in einen inneren und einen äußeren Bestandteil zerlegen läßt, wobei die Teile ihre Quellen im Inneren und im Äußeren der Erdoberfläche haben. Es stellte sich dann bald heraus, daß der weitaus überwiegende Teil der Quellen im Inneren der Erde liegt.

Es handelt sich hier jedoch offenbar um eine reine Beschreibung, nicht um eine dynamische Theorie, die man heranziehen könnte, um den Mechanismus zu verstehen. Um diese zu erhalten, mußte man noch ein Jahrhundert warten. Im Augenblick haben wir ein ausgezeichnetes und in vieler Beziehung tiefgehendes Verständnis der Physik des Erdinneren, wenn auch nicht so quantitativ wie unser Verständnis der Planetenbewegungen, aber gut genug für eine hinreichende Einsicht. Es wird nun meine Aufgabe sein, Ihnen einen Einblick in die Natur des Erdinneren zu vermitteln.

Es liegt wohl in der Natur aller Wissenschaft, daß ein spezielles Gebiet am Anfang seiner Erforschung hoffnungslos dunkel und am Ende klar und hell erscheint; das Erdinnere bildet darin keine Ausnahme. Hier wie in vielen Fällen der angewandten Naturwissenschaften können die Resultate nur aus einer Wechselwirkung verschiedener, in der sogenannten „reinen“ Wissenschaft ganz getrennter Spezialgebiete gewonnen werden. Im Falle der Konstitution des Erdkörpers sind das hauptsächlich drei Gebiete, die Mineralchemie, die Mechanik und das, was man jetzt mit Magnetohydrodynamik bezeichnet.

Das Studium des Erdkörpers hat sich sehr spät entwickelt; die ersten Anfänge sind weniger als ein Jahrhundert alt. So kam es, daß man bis zum Ende des neunzehnten Jahrhunderts so gut wie nichts von der Physik und ebenso wenig von der Chemie des Erdkörpers wußte. Während dieser Vorgeschichte war man auf phantasievolle Spekulationen angewiesen. In Abbildung 1 zeige ich eine frühe Ansicht des Erdinneren, die von einem Manne namens *Athanasius Kircher* in einem Buch mit dem Titel „Mundus Subterraneus“ im Jahre 1665 veröffentlicht wurde. Dieser Kircher war ein recht bemerkenswerter Mann und zu seiner Zeit sehr berühmt. Er war Jesuit und hatte erst in Würzburg und später in Rom Vorlesungen gehalten. Er war ein richtiger Mensch der Renaissance, das heißt er wußte alles und hat über noch mehr geschrieben. Er ist anderen seiner Zeitgenossen darin gefolgt, daß er nicht sehr scharf zwischen Wissenschaft und Kunst unterschieden hat, wie man aus der Abbildung ersehen kann.

Ich will jetzt mit der Mineralchemie anfangen. Die Kenntnisse, die man hier braucht, sind von spezieller Art: man muß ausfindig machen, woraus die Erde im ganzen zusammengesetzt ist. Ein spezieller Zweig der Geochemie, der von einem hervorragenden Manne begründet wurde, beschäftigt sich damit. Dieser Mann, dessen Ruhm leider mit seinem Verdienst nicht schrittgehalten hat, heißt *Victor Goldschmidt*. Er hat den größten Teil seines Lebens, abgesehen von einigen Jahren in denen er in Göttingen gelehrt hat, in Oslo zugebracht, wo er Professor der Mineralogie und Geologie war. Er hat früh eingesehen, daß man zum Eindringen in die Physik der Erde und des Planetensystems die chemische Zusammensetzung des

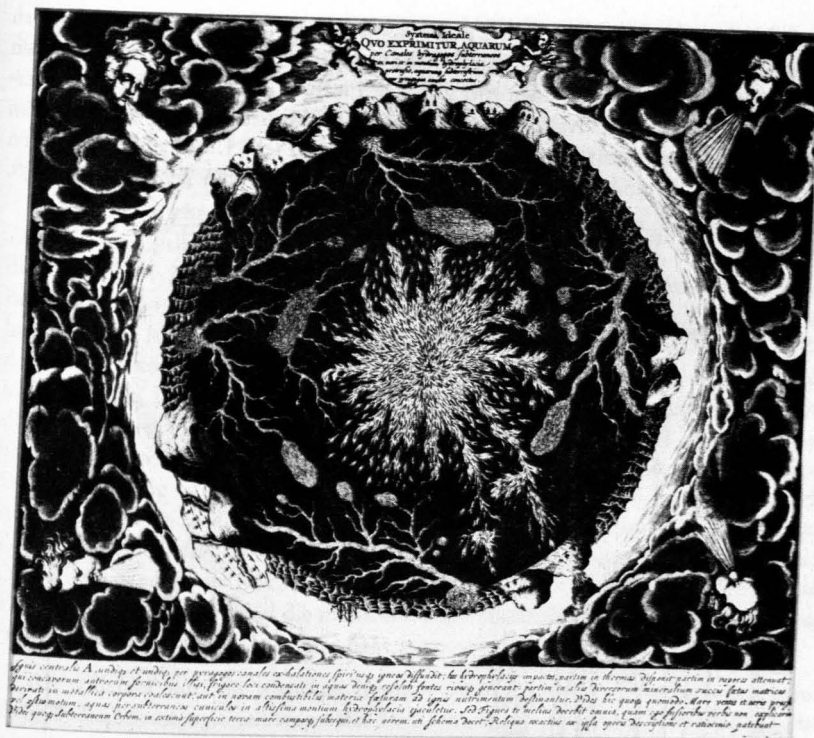


Abb. 1

Erdkörpers kennen muß; und um die Häufigkeitsverhältnisse der dort vorhandenen Elemente herauszufinden, hat er Tausende und Abertausende von quantitativen Analysen gemacht. Es gelang ihm, eine richtige Fabrik für solche Analysen zu organisieren, deren Arbeiter Doktoranden waren. Die Hauptresultate seiner Forschungen erschienen in den zwanziger Jahren unter dem Titel: „*Geochemische Verteilungsgesetze der Elemente*“. — Es gibt drei Quellen, um die Häufigkeit der Elemente zu bestimmen: 1. die chemische Analyse von Gesteinen, 2. die entsprechende Analyse von Meteoriten und 3. die Spektralanalyse der Sonne. Andere Methoden gibt es praktisch nicht. Goldschmidt hat die ersten zwei systematisch ausgebeutet; seine Resultate sind dann durch andere Forscher mit den spektroskopischen verbunden worden; die hierauf basierende Tabelle der sogenannten kosmischen Häufigkeiten von *Süss und Urey* ist allgemein bekannt. Ich zeige diese Resultate in Abbildung 2. „Kosmische Häufigkeit“ bedeutet aber nur Häufigkeit in unserem Sonnensystem. Das bemerkenswerte an dieser Kurve ist, daß die Ordinate eine logarithmische Skala darstellt mit sehr vielen Zyklen. Da die Kurve so ungeheuer rasch abfällt, können nur ganz wenige Elemente in der Zusammensetzung des Erd-

körpers wichtig sein. Die materiellen Eigenschaften, z. B. die Dichte und elastischen Konstanten sind roh gesprochen lineare Funktionen der Komponenten; daher haben kleine Verunreinigungen nur einen sehr geringen Einfluß. Die Goldschmidtsche Analyse zeigt, wie gering die Anzahl dieser Elemente wirklich ist. Weiterhin darf man diejenigen Elemente vernachlässigen, die entweder selbst sehr flüchtig sind oder von denen einfache Verbindungen große Flüchtigkeit besitzen. Dahin gehören: H_2 , H_2S ,

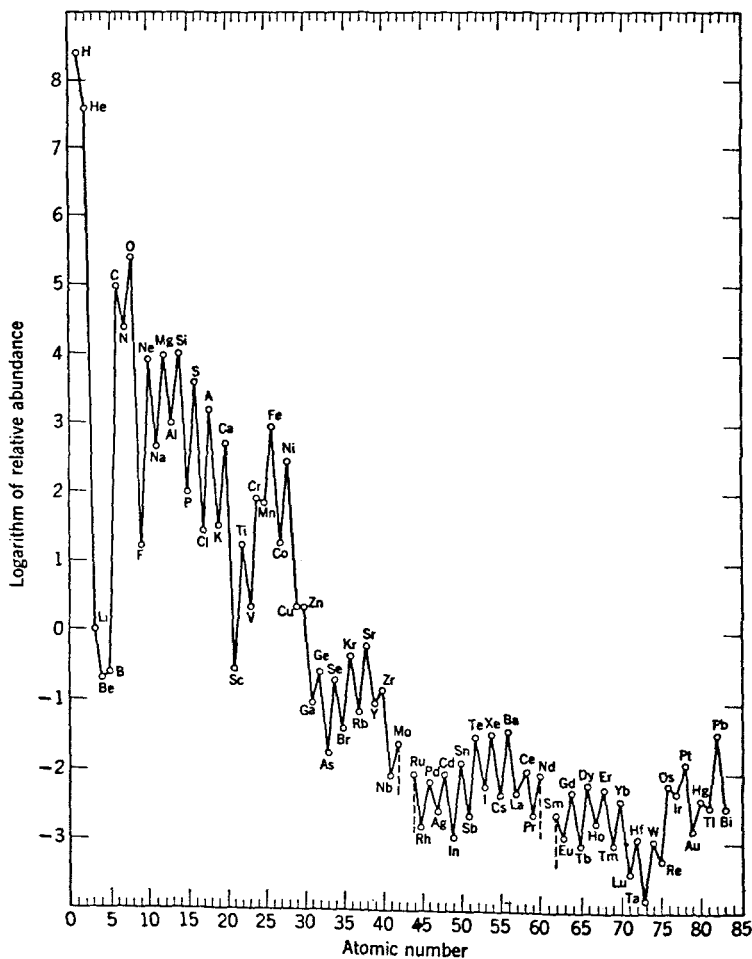


Figure 2.1 Relative abundances of the elements, referred to Si = 10,000, plotted against atomic number. (From Ahrens, *Distribution of the elements in our planet*. Copyright, 1965, McGraw-Hill Book Co. Used by permission.)

Abb. 2

CO₂. Was übrig bleibt, sind außer einigen H₂O die folgenden Elemente: Silicium, Sauerstoff, Magnesium und Eisen. In zweiter Linie noch ein wenig Calcium, Aluminium, Natrium, Titan und Nickel. Alle anderen Elemente kommen in so außerordentlich kleinen Konzentrationen vor, daß man ihren Einfluß auf die physikalischen Eigenschaften des Erdkörpers völlig vernachlässigen kann. Das ist ein ganz überraschend einfaches Resultat der Geochemie.

Meteore bestehen aus Steinen und gelegentlichen Stücken von metallischem Eisen. Das hauptsächlichste Material der Steinmeteoriten ist ein Mineral, das Olivin heißt; die Formel ist Mg₂SiO₄; außerdem kann das entsprechende Eisensilikat, Fe₂SiO₄ isomorphisch in das Magnesiumsilikat einkristallisieren. Natürliche Olivine enthalten hauptsächlich Magnesium und einen kleinen Prozentsatz von Eisensilikat. Die Idee, daß der Erdkörper hauptsächlich aus Olivin oder sehr verwandten Magnesiumsilikaten besteht, ist seit Jahrzehnten eine plausible Grundannahme gewesen und hat sich auch durchaus erhalten, trotz zahlloser Versuche, sie durch alle möglichen, weniger einfache Hypothesen zu ersetzen. Es hat sich gezeigt, daß unter höheren Drücken, wie sie in der Tiefe von einigen hundert km herrschen, Olivin nicht mehr stabil ist, sondern in andere Silikate übergeht. Bei noch größeren Drücken, wie man sie in Tiefen in der Größenordnung von 500—1000 km vorfindet, zerfällt das Olivin in Oxyde von Silicium und Magnesium. Diesen thermodynamischen Umständen des Erdkörpers sind die modernen experimentellen Methoden mit den hohen Drücken in den letzten Jahren sehr nahe gekommen.

Ich will hier nun ein wichtiges Resultat der Seismologie vorwegnehmen, bevor ich über die Seismologie selbst spreche. In einem Abstand von der Erdoberfläche, der ungefähr 45 % des Erdradius beträgt, findet man eine Diskontinuitätsfläche, die sich durch Reflektion der Erdbebenwellen kund tut. Die Grenzfläche ist ganz scharf; die einfallende Welle wird in einen reflektierten und einen gebrochenen Teil zerlegt; die Brechung findet in ganz gewöhnlicher Weise statt. Der Teil der Erde außerhalb dieser Grenzfläche heißt der Erdmantel, der Teil innerhalb der Grenzfläche ist der Erdkern. Der Radius des Kernes kann sehr genau bestimmt werden; nach den letzten Untersuchungen mißt er 3485 km mit einer Genauigkeit von ± 3 km. Die beobachtete grundlegende Eigentümlichkeit des Erdkernes besteht darin, daß sich in ihm keine Transversalwellen fortpflanzen. Nie in der Geschichte der Seismologie ist eine solche Welle im Erdkern beobachtet worden. Schon zu Beginn dieses Jahrhunderts hat *Beno Gutenberg*, damals in Göttingen arbeitend darauf hingewiesen, daß der Erdkern aus geschmolzenem Eisen bestehen muß. Andere Hypothesen sind immer wieder aufgestellt worden, aber keine hat lange gelebt. Der Hauptgrund dafür ist, daß eine weitere Bedingung erfüllt sein muß: Als mittlere Dichte der Erde muß der Wert 5.5 herauskommen.

Der moderne Physiker hat glücklicherweise noch andere Kriterien, insbesondere das sogenannte Pauliprinzip, das besagt, daß sich nicht mehr als eine gewisse Anzahl von Elektronen in der Umgebung eines Atomkernes gegebener Ladung aufhalten können. Das ist ungefähr äquivalent einer Zustandsgleichung, in der die

Kernladung als Parameter auftritt. In Abbildung 3 ist die Dichte als Abzisse in linearem Maßstab, der Druck als Ordinate in logarithmischem Maßstab eingetragen. Die Werte auf der linken Seite der Kurven kommen von gewöhnlichen Messungen, die auf der rechten Seite sind theoretisch für nahezu unendliche Kompression aus Prinzipien der Quantenmechanik berechnet worden. Wie man sieht, stehen die aus Seismologie erhaltenen Werte für das Erdinnere an den richtigen mittleren Plätzen. Ich will nur noch bemerken, daß der Druck an der Kerngrenze 1.35 Megabar, der Druck am Erdmittelpunkte 3.6 Megabar beträgt. Ein Bar ist fast genau eine Atmosphäre, d. h. 1 kg pro cm^2 .

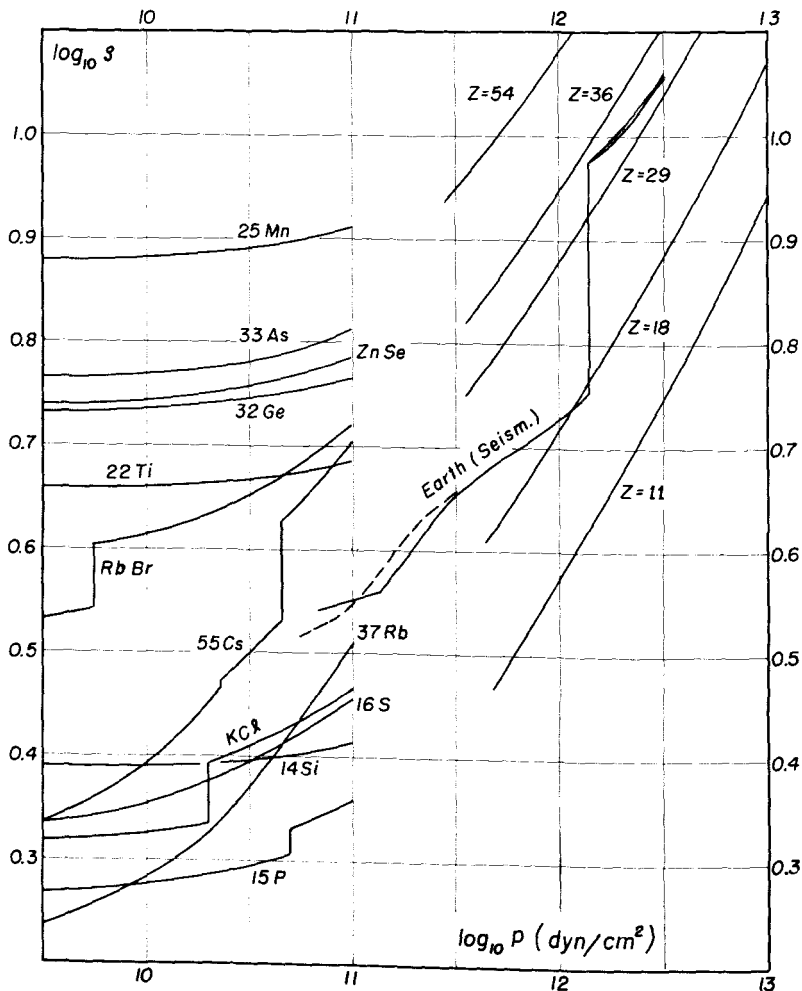


Abb. 3

In der Mitte des Kernes findet man ein kleineres Gebilde, den sogenannten „Inneren Kern“, der einen Radius von ungefähr 1225 km besitzt; aber die Meßgenauigkeit ist hier geringer. Die Schwierigkeit bei der Beobachtung des inneren Kernes besteht darin, daß man nur seismische Strahlen gebrauchen kann, die fast senkrecht heruntergehen und nahe den Antipoden wieder auftauchen. Das macht alle Winkel der Beobachtung klein und reduziert die Genauigkeit. Nach vielen Diskussionen haben sich die Spezialisten ziemlich geeinigt, daß der innere Kern festes Eisen ist, da man kein anderes Element von genügender Häufigkeit kennt, um das Volumen des inneren Kernes auszufüllen. Das zeigt sehr deutlich die Stärke der Häufigkeitsargumente: Obwohl das Volumen des inneren Kernes nur ungefähr 0,7 % des gesamten Erdvolumens ist, kann man kein Element außer Eisen finden, das solch ein Volumen plausibel ausfüllen könnte.

In den letzten Jahren sind die seismologischen Beobachtungen so genau geworden, daß man nun sagen kann, daß die gemessene Dichte des flüssigen äußeren Erdkernes einige Prozent kleiner ist als es die von reinem Eisen unter dem entsprechenden Druck wäre. Man schließt daraus, daß im Eisen noch andere Substanzen in Lösung sind und da diese vermutlich alle leichter sind als Eisen, reduzieren sie die Dichte. Zahlreiche Arbeiten und Diskussionen haben zur Elimination aller Möglichkeiten außer zweien geführt: Diese zwei sind atomares Silizium und atomarer Schwefel (oder entsprechende Atomionen).

Ich möchte jetzt noch ein Wort über die Flüssigkeitsbewegungen im Erdkern sagen, weil diese, wie wir bald sehen werden, wesentlich sind für den Mechanismus, der das Magnetfeld der Erde erzeugt. Hier haben wir wieder zwei Möglichkeiten für solche Bewegungen, die ausgedehnte Kritik überlebt haben: Erstens ist es durchaus möglich, daß eine gewisse Menge von Kalium im flüssigen äußeren Erdkern gelöst ist; das Kalium besitzt ein langlebiges radioaktives Isotop und dieses würde dann den Kern heizen. Wenn die Wärme vom Mantel weggeführt wird, dann wird sich im flüssigen Kern Konvektion ausbilden. Die andere Möglichkeit besteht darin, daß das flüssige Eisen sehr, sehr langsam an seiner unteren Grenze ausfällt, d. h. daß der feste innere Kern auf Kosten der Flüssigkeit langsam wächst. Dabei wird die Lösung in der Nachbarschaft der Grenzfläche konzentrierter und demnach aus den angegebenen Gründen, da die weniger konzentrierte Flüssigkeit leichter ist, wird Konvektion erzeugt.

Ich habe zwar schon etwas vorausnehmend von der Seismologie gesprochen, will die Seismologie aber jetzt nochmals hervorheben als die zweite der Methoden, die zur Erforschung des Erdinneren dient. Seismographen sind sehr einfache mechanische Instrumente, in denen man eine schwere Masse an feinen Drähten aufhängt und dann ihre Bewegung relativ zur Erde mißt, wenn die Erde schwingt und die getrennte Masse infolge ihrer Trägheit nicht mitschwingt. Die Erdbebenwellen, die man mißt, sind ganz gewöhnliche Schallwellen, nur von sehr niedriger Frequenz. Diese Frequenz ist von der Größenordnung von Sekunden und die Wellenlänge von der Ordnung von Kilometern. Wenn die Fortpflanzungsgeschwindigkeit sich ändert, dann tritt Brechung

ein. Die Geschwindigkeit der Wellen nimmt mit der Tiefe zu; das bedeutet, daß die entsprechenden Strahlen vom Lote, also vom Radiusvektor, weggebrochen werden. Außerdem findet natürlich diskontinuierliche Brechung an Grenzflächen statt, siehe Abbildung 4. Im Erdinnern gibt es hauptsächlich eine solche Grenzfläche, nämlich die zwischen Stein und Eisen, d. h. zwischen Erdmantel und Erdkern. Man mißt die Zeit, die zwischen dem Erbeben, dessen Zeit sich gewöhnlich durch Triangulation mehrerer naher Beobachter bestimmen läßt, und dem Erscheinen des Bebens am Seismograph vergeht. Diese Laufzeit wird als Funktion des Winkels zwischen dem Erdbebenherd und dem Seismograph tabuliert und ist das Rohmaterial der Seismologie. Die Laufzeiten gehen von wenigen Sekunden bis zu fast einer halben Stunde. Am Anfange dieses Jahrhunderts hat der Mathematiker *Herglotz* in Göttingen eine Differentialgleichung aufgestellt, aus der man die Variation der Geschwindigkeit mit der Tiefe aus diesen Laufzeiten erhalten kann. Von solchen Resultaten wurden die Kurven der Abbildung 5 erhalten, die eine Kurve von *Jeffreys* und *Bullen* in England und die andere von *Gutenberg* seit 1930 in Pasadena. Wie man sieht, sind die beiden Kurven fast ununterscheidbar.

In den letzten Jahren hat man auch die *Eigenschwingungen* der Erde ausführlich studiert. Da die Erde wenig Dämpfung hat, kann sie durch ein großes Erdbeben zu Schwingungen angeregt werden, die viele Stunden lang nachklingen. Aus der Gesamtheit dieser Daten konnte man nun die mechanischen Eigenschaften des Erdkörpers mit beträchtlicher Genauigkeit bestimmen. Ich habe kürzlich eine Tabelle in einem Buch gesehen, die die mechanischen Eigenschaften der Erde, Dichte, Elastizitätsmoduln etc. in Schritten von 100 km angibt, mit einer Zuverlässigkeit von ungefähr 2 %.

Da ich nun von den mechanischen Eigenschaften des Erdkörpers spreche, kann ich mich nicht enthalten, ein verhältnismäßig neues Gebiet zu erwähnen, das der Konvektion im Erdmantel. Der Erdmantel ist zwar fest, aber wie alle festen Körper kann er durch Plastizität verformt werden. Theoretisch wußte man seit langem, daß thermale Konvektion vorhanden sein sollte. Man ist davon aber erst überzeugt, seit entsprechende Erscheinungen im Laufe der letzten 15 Jahre beobachtet wurden. Die Geschwindigkeiten dieser Bewegungen sind von der Größenordnung einiger Millimeter pro Jahr. Schon zu Anfang dieses Jahrhunderts hat der bemerkenswerte *Alfred Wegener* horizontale Bewegungen der Kontinente angenommen, er ist aber von den Geologen verlacht worden. Nur die Geologen der Südlichen Halbkugel konnten sich der Evidenz nicht entziehen, die darin besteht, daß sich die Schichten von Südamerika, Südafrika und Australien so außerordentlich ähneln, daß man einen gemeinsamen Kontinent, der dann aufgebrochen ist, annehmen mußte. Aber damals hatte man von der Mechanik solcher Prozesse noch nicht die geringste Ahnung; heute ist man dabei, diese Erscheinungen zu verstehen. Dadurch unterliegt die Geologie jetzt einer so großen Revolution, wie sie nur wenige Wissenschaften im Laufe ihrer Geschichte erlebt haben. Und das alles fing damit an, daß sich die Physiker und die Ingenieure zu Beginn dieses Jahrhunderts um die Erscheinungen der Plastizität der Festkörper zu kümmern begannen. Heute kann man die Ent-

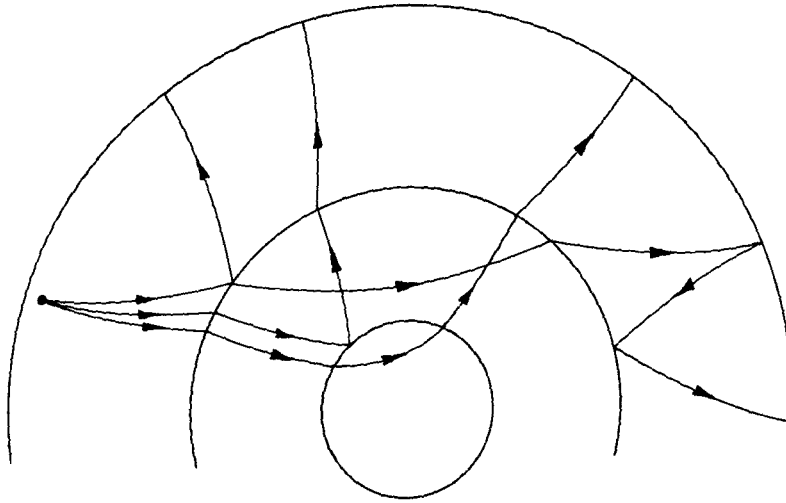


Abb. 4

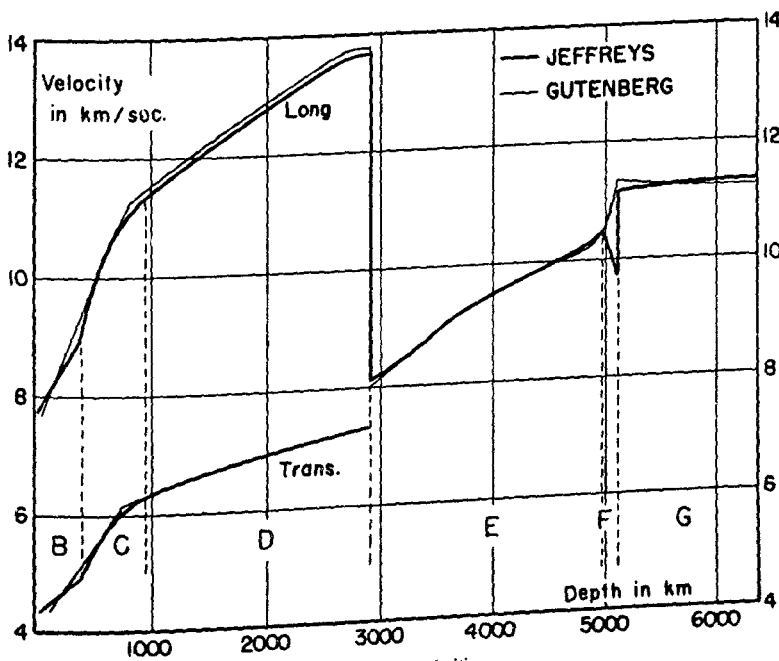


FIG. 3. Seismic velocities.

Abb. 5

stehung von Gebirgen, die Millionen von Jahren erfordert, das Fließen von Gletschern, das einige Jahrzehnte in Anspruch nimmt und das Schmieden des Stahles, das in Sekunden vor sich geht, als einheitliche Anwendungen der Prinzipien der Plastizität ansehen, genauso wie man die Bewegung der Planeten und der Milchstraßen auf der einen Seite und die Bewegung eines Uhrwerks auf der anderen seit *Newton* als Ausdruck desselben Naturgesetzes anzusehen hat.

Nun komme ich endlich zu der dritten Methode, die zur Erforschung des Erdkörpers dient, das ist das Studium des Erdmagnetismus. Hier hat Gauß Grundlagen geschaffen, die immer noch gut sind, aber das Verständnis dessen, was vor sich geht, d. h. die Physik, die über die rein geometrische Beschreibung hinausgeht, mangelte völlig. Der große Durchbruch kam im Jahre 1908 aus einer ganz unerwarteten Richtung. In diesem Jahre hat der Amerikaner *Georg Hale* den Magnetismus der Sonnenflecken entdeckt. Hale selbst ist eine ganz bemerkenswerte Erscheinung in der Entwicklung der Wissenschaft. Er war durch ererbtes Vermögen ein steinreicher Mann, so steinreich, wie es das zu dieser Zeit nur in Amerika gab. Als solcher hatte er gesellschaftlichen Zugang zu anderen steinreichen Leuten, ohne sich besonders bemühen zu müssen. Aber trotz seines Geldes hatte er nur eine Leidenschaft, die Wissenschaft, besonders die Astronomie. Mit Hilfe seiner Beziehungen gelang es ihm, andere Krösusse von dem Interesse der Wissenschaft zu überzeugen; unter diesen war besonders der König der Reichen, der Stahlfabrikant *Carnegie*. Mit Hilfe von Carnegie und zum Teil mit seinem eigenen Geld baute er dann das Observatorium auf dem Gipfel des Mount Wilson auf, der von Los Angeles aus sehr bequem zu erreichen ist. Seine Heliostaten, mit denen er die erste systematische Erforschung der Sonne ausführte, sind ja weltbekannt. So fand er denn auch den Magnetismus der Sonnenflecken, und die Felder sind hier, wie alles was man in Californien findet, wie das Amerikanische Sprichwort sagt, größer als irgendwo anders in der Welt. Das Magnetfeld eines Sonnenflecks ist von der Größenordnung von mehreren Tausend Gauß, oft 4000—5000, und es erstreckt sich über die ganze dunkle Region, die gewöhnlich ein Mehrfaches der Größe der ganzen Erdoberfläche einnimmt. In Abbildung 6 sieht man, wie die Kraftlinien aus einem Fleck heraustreten und in der Nähe wieder hineintreten. In der Tat stellte sich heraus, daß die Dunkelheit der Sonnenflecken nichts anderes ist als die Verminderung der Temperatur, um etwa 1000° , die nötig ist, um den zusätzlichen mechanischen Druck des Magnetfeldes zu kompensieren. Die Physiker haben sofort eine Analogie der Sonnenfelder mit dem Erdfelde vermutet, aber es hat noch fast 40 Jahre gedauert, bis mit einer quantitativen Theorie auch nur begonnen wurde.

Ende der vierziger Jahre hat der Physiker *Vestine*, der die großen Hilfsmittel der Carnegie-Stiftung zur Verfügung hatte, weltweite Karten der magnetischen Variation konstruiert. In Abbildung 7 zeige ich ein typisches Beispiel. Die Linien sind Linien konstanter Zeitableitung der vertikalen Komponente des Feldes, d. h. Linien von konstanten dZ/dt . Es sind also nicht Karten des Feldes selbst, sondern seiner Zeitabhängigkeit. Aus der Geschwindigkeit mit der diese Linien sich auf der Erdoberfläche bewegen, kann man direkt die Geschwindigkeit der Flüssigkeit im

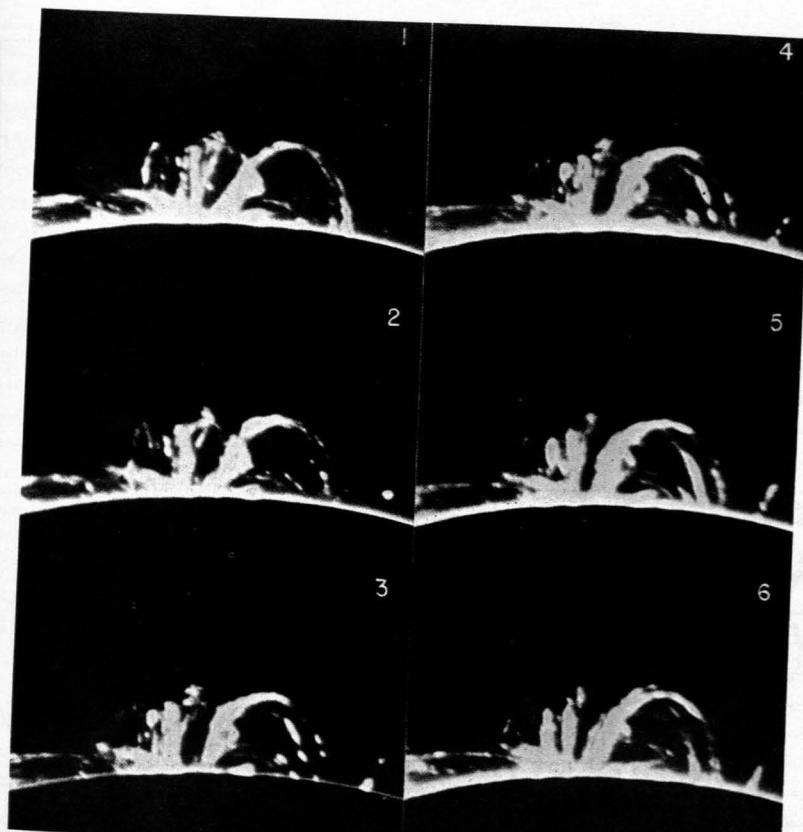


Abb. 6

Erdkern erschließen, sie beträgt einige Zehntel von Millimetern pro Sekunde. Das ist für einen Festkörper ein unmöglich großer Wert, da solche Änderungen in einem Festkörper zu Wärmetönungen Anlaß geben würden, die ganz unmöglich für geologische Zeiten dauern könnten; aber man weiß ziemlich sicher, daß diese magnetischen Variationen während der ganzen Lebenszeit der Erde vor sich gingen. Die Deutungsschwierigkeiten verschwinden aber völlig, wenn man annimmt, daß die Ströme in bewegten Metallmassen fließen. Die Tatsache, daß da Verstärkung eintreten kann, hängt mit der Selbstinduktion der Metallmasse zusammen. Die Selbstinduktion ist dem Quadrat der Lineardimensionen proportional, so daß ein Ringstrom, der im Laboratorium in einer Millisekunde abklingt, im Erdkern über tausend Jahre leben kann. So erhält sich der Strom lange genug bis er durch eine mechanische Bewegung verstärkt werden kann.

Abb. 7

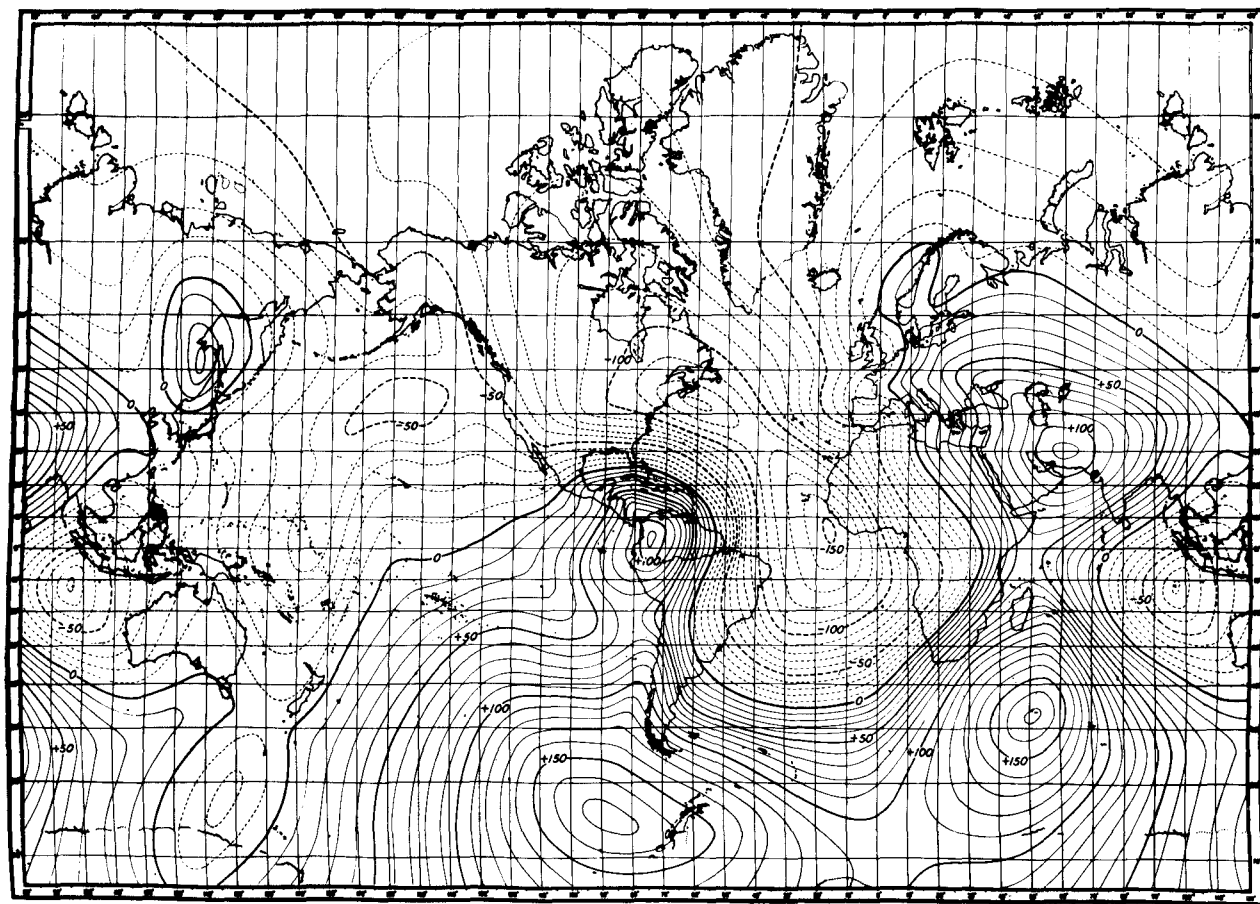


FIG. 133(A)—GEOMAGNETIC SECULAR CHANGE IN GAMMAS PER YEAR, VERTICAL INTENSITY, EPOCH 1922.5

Abbildung 8 zeigt den grundlegenden Mechanismus: Wann immer man eine Scherungsbewegung hat, dann werden die magnetischen Kraftlinien ausgezogen. Nun kann man mathematisch beweisen, daß für einen Leiter, dessen Leitfähigkeit sehr gut ist, d. h. der einen zu vernachlässigenden elektrischen Widerstand hat, die magnetischen Kraftlinien sich mit der Flüssigkeit wie eingefroren mitbewegen. Wie man sieht, erzeugt jede Scherung der Flüssigkeit eine Streckung der Kraftlinien und damit eine Verstärkung des Feldes. Die Bewegung des Erdkernes ist durch die Corioliskraft beeinflusst, d. h. durch die Folgen der Erdrotation, und das ist für die Erscheinung von Scherungen besonders günstig. Die mathematische Lösung des Dynamoproblems ist jedoch sehr, sehr schwierig, weil das Problem, wie der Mathematiker sagt, so hochgradig nichtlinear ist, daß alle gewöhnlichen Methoden der theoretischen Physik versagen. In den letzten Jahren haben jedoch jüngere Theoretiker dieses Gebietes, insbesondere Herr *F. H. Busse*, grundlegende Fortschritte gemacht.

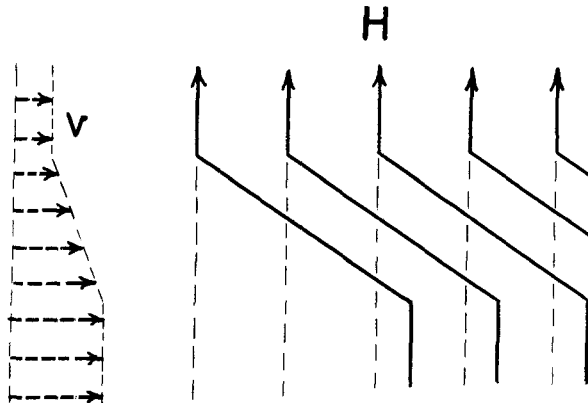


Abb. 8

Zum Schlusse möchte ich noch eine ganz bemerkenswerte Entdeckung erwähnen, das ist die plötzliche Umklappung des Erdmagnetfelds. Seit Jahren hat man schon den fossilen Magnetismus studiert durch den remanenten Magnetismus der Gesteine, und das ist eine blühende Spezialität. Später hat man dann gefunden, daß das Erdfeld ab und zu seine Richtung umklappt. Das kommt im Mittel anscheinend alle halbe Million Jahre vor, aber das ist nur eine statistische Zahl, und manchmal kann das Magnetfeld für Millionen von Jahren in derselben Richtung bleiben. Diese Richtung ist angenähert, aber gut angenähert, parallel der Rotationsachse der Erde; das wird darauf zurückgeführt, daß die Corioliskraft die Bewegungen im Erdinnern beherrscht. Abweichungen vom Parallelismus kommen häufig vor, sie sind besonders in Sternen beobachtet worden. Herr *Babcock* vom Mount Wilson hat fast hundert magnetische Sterne im Laufe der Jahre gefunden. Da die

untere Grenze der Beobachtungen ungefähr 500 Gauß ist, kann man erst sehen, daß ein Stern magnetisch ist, wenn ein beträchtlicher Teil seiner Oberfläche ein genügend großes magnetisches Feld hat. Daraus hat Herr Babcock geschlossen, daß es keine genaue Korrelation zwischen Rotation und Richtung des Magnetfeldes gibt, aber die Rotation ist nötig, wie auch die Anwesenheit einer konvektiven Schale in dem Stern; das sind qualitative Eigenschaften, die man an Hand der Grundgleichungen diskutieren kann, aber viel mehr kann man augenblicklich noch nicht erreichen. Auch hat sich gezeigt, daß der Beitrag von Magnetfeldern zum Energiehaushalt des Universums vernachlässigbar klein ist. So haben wir es also mit einem kosmischen Spielzeug zu tun, das technologisch vielleicht nicht so wichtig ist. Aber es ist wenigstens ein billiges Spielzeug im Vergleich mit den viel teureren Spielzeugen, die man zur Erforschung der Planeten verwendet. So haben wir hier etwas gefunden, das die Neugier und den Spielbetrieb des alten Kepler und des alten Gauß sehr befriedigt hätte.